



การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับกลุ่มอาคารที่พักอาศัยด้วยวิธีหาค่าความเหมาะสม

Economic Suitability Analysis of Solar Photovoltaic Modules and Energy Storage Systems Installation in Residential Units Group with Optimization Method

จิรกร รียะทา¹ ยศธนา คุณาทร^{1,2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

²สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

155 ม.2 ตำบลแม่เหียะ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

Jirakorn Riyathar¹, Yottana Khunatorn^{1,2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangmai University

239 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai, Thailand, 50300

²Energy Research and Development Institute-Nakornping Chiangmai, Thailand 50100

155 Moo 2, Mae Hia Subdistrict, Mueang District, Chiang Mai Province 50100

*ผู้รับผิดชอบบทความ: jirakorn_riyathar@cmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-8268-3878

Received: 30 September 2024, Revised: 15 January 2025, Accepted: 17 January 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับกลุ่มที่พักอาศัยรวม 11 หลังมีห้องพักจำนวน 220 ห้อง โดยใช้การสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์และคำนวณหาค่าความเหมาะสมด้วยวิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป GRG (Generalized Reduced Gradient) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยการให้ค่าต่ำสุดของมูลค่ารวมโครงการภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดผลการวิเคราะห์พบว่า การติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 kW เพียงอย่างเดียวทำให้มูลค่ารวมของโครงการต่ำที่สุด และยังทราบถึงกำลังผลิตที่เหมาะสมในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมระบบกักเก็บพลังงานจะไม่มี ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาต่อหน่วยของระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบันมีราคาสูงจึงใช้เกณฑ์ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานเพื่อให้ใช้ประสิทธิภาพจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 100% คือเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตเหลือเกินจากการความต้องการมาใช้ ในระบบกักเก็บพลังงาน พบว่าค่าที่เหมาะสมของกำลังผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คือ 11kW และระบบกักเก็บพลังงาน 8kWh โดยการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน สามารถลดการใช้พลังงานจากกริดได้ 23,158 หน่วย/ปี ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลงได้ 99,579 บาท/ปี และช่วยลดการปล่อย CO₂ ได้ 27,790 กิโลกรัมต่อปี ในกรณีติดตั้งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานจะมีระยะเวลาคืนทุน 4 ปี สามารถลดการใช้พลังงานจากกริดได้ 25,689 หน่วย/ปี และช่วยลดการปล่อย CO₂ ได้ 30,827 กิโลกรัมต่อปี ผลลัพธ์เหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการตัดสินใจลงทุนและจัดทำนโยบายในการจัดหาพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับ คือ ขบวนการหาค่าความเหมาะสมโดยใช้สมการวัตถุประสงค์จากตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ อัลกอริทึม GRG ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โมเดลทางคณิตศาสตร์ ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์



Abstract

This article presents an economic feasibility analysis of installing solar photovoltaic (PV) modules and energy storage systems for a residential complex of 11 buildings with 220 rooms. In total. The analysis employed a mathematical model and the Generalized Reduced Gradient (GRG) method to solve nonlinear optimization problems, by finding the minimum total project cost under specified conditions. The analysis reveals that installing a standalone 10 kW solar PV module results in the lowest total project cost and the optimal production capacity. Installing solar PV modules combin with an energy storage system is found to be economically unfeasible due to the high recent cost per unit of energy storage systems. Energy storage is applied for using the 100% solar energy efficiency by storing excess produced energy over the demand. The optimal product of the solar PV module and the energy storage system are 11 kW and 8 kWh, respectively. The installation of solar PV module has a payback period of 2 years and 9 months, which reduce the consumption of grid electricity by 23,158 kWh per year, decrease the electricity costs by 99,579 Baht per year, and diminish the CO₂ emissions by 27,790 kilograms per year. While the solar PV module with an energy storage system, has the payback period in 4 years, with the reduction of grid electricity consumption by 25,689 kWh per year and the reduction of CO₂ emissions by 30,827 kilograms per year. These findings are crucial for decision-making and policy formulation regarding renewable energy adoption as an alternative to fossil fuels. The key contribution of this study is the methodology for optimization using an objective function derived from relevant variables.

Keywords: GRG Algorithm, Objective Function, Mathematical Model, Economic Suitability Analysis

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ในทุกภาคส่วน ภายในปี ค.ศ. 2065 [1] จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม้เกาะในฐานะผู้ผลิตไฟฟ้าหลักจากเชื้อเพลิงถ่านหินจึงตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ โดยโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีอัตราการปล่อย CO₂ ในระดับ 1.1 - 1.3 kg CO₂/kWh [2] ประเทศไทยมีแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า [3] ตั้งเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าให้มากขึ้น โรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะได้รับผลกระทบเนื่องจากใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเนื่องจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์ในการจ่ายไฟฟ้าให้ภาคเหนือ (Must Run) จึงต้องเดินเครื่องต่อเนื่องดังนั้นต้องมีการศึกษาวิจัยความคุ้มค่าของการติดตั้งพลังงานทางเลือกอื่นมาใช้ผลิตไฟฟ้าร่วมกับโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล ตามที่ กฟผ. ได้จัดทำ

ข้อเสนอโครงการแม่เมาะเมืองน่าอยู่ [4] เพื่อขอรับการพิจารณาเป็นเมืองอัจฉริยะของประเทศไทย (SmartCity) จากสำนักงานเศรษฐกิจดิจิทัลตามนโยบายของรัฐบาล คือการพัฒนาพื้นที่ อ.แม่เมาะให้ เป็นเมืองอัจฉริยะด้านพลังงาน (Smart Energy) ปัจจุบัน กฟผ. มีนโยบายใช้พื้นที่ กฟผ. แม่เมาะ จัดทำศูนย์สาธิตพลังงานโดยให้พื้นที่บ้านพักพนักงาน กฟผ. ได้มีโครงการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลเพื่อบันทึกข้อมูลการใช้ไฟฟ้า รวมทั้งมีแผนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อลดความต้องการการใช้ไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นในการศึกษาความเหมาะสมของขนาดระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน การจัดเก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อทำนายถึงพฤติกรรมของผู้ใช้ไฟฟ้าอีกทั้งวิเคราะห์ปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากโมดูล แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อประมวลผลหาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยลักษณะการอยู่อาศัยเป็นบ้านพักสำหรับพนักงานที่ปฏิบัติงานใน กฟผ. แม่เมาะ และสามารถพักอาศัยร่วมกับครอบครัวได้การพักอาศัยของพนักงานมีอยู่ 2 ประเภท คือ พนักงานที่ทำงาน



ตามเวลาปกติและพนักงานที่ทำงานเป็นกะโดยบ้านพักพนักงานเป็นที่พักอาศัยประเภทแฟลตมีการจัดกลุ่มสำหรับแฟลตที่อยู่ใกล้กันจะนับเป็น 1 กลุ่มแฟลต โดยบ้านพักพนักงาน กฟผ.แม่เมาะ ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มแฟลตซึ่งจะมีรูปแบบพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าชุมชนคือมีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าส่วนมากอยู่ในช่วงกลางวัน สำหรับกลุ่มอาคารที่พักอาศัยในรูปแบบดังกล่าวมีความท้าทายในเรื่องของการลดการใช้พลังงานจากพลังงานทดแทนเนื่องจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าส่วนมากอยู่ในช่วงกลางวัน แต่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟได้ในช่วงกลางวันซึ่งการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานเพื่อลดการใช้ไฟฟ้านั้นก็มีต้นทุนที่สูงเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์ความเหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์โดยวิธีหาค่าความเหมาะสมแบบ GRG [5] โดยมีเป้าหมายคือต้องการติดตั้งระบบผลิตพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานพลังงานโดยมีต้นทุนรวมต่ำที่สุด

1.2 การทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาปัจจัยด้านพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของชุมชน [6] โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากย่านที่พักอาศัยทุก 30 นาทีเป็นเวลาหนึ่งปีและเก็บข้อมูลจากการทำแบบสอบถามครัวเรือนที่เก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าเกี่ยวกับลักษณะที่อยู่อาศัย จำนวนผู้พักอาศัย เครื่องใช้ไฟฟ้า ทักษะในการอนุรักษ์พลังงานผลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าการใช้แบบ Wrapper Feature Selection (WFS) สามารถใช้หาตัวแปรพฤติกรรมที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้า คือ การครอบครองเครื่องใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวจะไม่ส่งผลโดยตรงต่อการใช้ไฟฟ้า ครัวเรือนที่มีเตาไฟฟ้าหนึ่งเครื่องหรือมากกว่านั้นมักจะเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าสูงและใช้คัดเลือกตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องออกโดยการลบปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นกับปัจจัยอื่น ๆ ออกเช่น การใช้โทรทัศน์และการใช้ตู้เย็นถูกลบออกเนื่องจากความสัมพันธ์ภายในกับตัวแปรอื่นในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ มีงานวิจัยที่ดำเนินการทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้น [7] 2 แบบ คือ การถดถอยเชิงเส้น, การถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง

โซล่าเซลล์ขึ้นอยู่กับ ค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ มายังระนาบทำมุมของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และยังพบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ และมีงานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ณ จังหวัดเชียงใหม่ [8] โดยพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลแปรผันตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบโมดูล และแปรผกผันกับอุณหภูมิโมดูล ถ้าอุณหภูมิโมดูลเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มรังสีเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ได้จะลดลงพบว่าอุณหภูมิแผงโมดูลแผงโมดูลเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 61° โดยที่อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลต่ออุณหภูมิโมดูลอีกด้วย และยังพบว่า ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับมุมของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบโมดูลโดยจะมีความเข้มสูงสุดเมื่อทำมุม 90° และมุมเฉียงจะมีประสิทธิภาพลดลงตามค่าโคไซน์ของมุมตกกระทบผลการทดสอบที่ได้จากโมเดลมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาความเหมาะสมในการลงทุนระบบพลังงานหมุนเวียนโดยศึกษาเกี่ยวกับอาคารที่มีการใช้พลังงานเท่ากับศูนย์ (Net Zero Energy Building) ในประเทศเดนมาร์ก [9] พบว่าสามารถหาค่าความต้องการใช้พลังงานสูงสุดจากแผงโซล่าเซลล์และพื้นที่ติดตั้งที่ครอบคลุมความต้องการการใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนได้ และอีกงานวิจัยที่มีการศึกษาอาคารที่มีการใช้พลังงานใกล้เคียงเท่ากับศูนย์ [10] โดยได้วิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน พร้อมทั้งเก็บข้อมูลเครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณความต้องการการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเดือนมีวัตถุประสงค์ให้อาคารมีการใช้พลังงานสุทธิใกล้เคียงเท่ากับศูนย์พร้อมติดตั้งระบบพลังงานทดแทนให้เพียงพอการดำเนินการวิจัยได้เปลี่ยนอุปกรณ์ทางไฟฟ้าให้ใช้กำลังไฟลดลงติดตั้งโซล่าเซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน การปรับปรุงอาคารในด้านสถาปัตยกรรมเพื่อลดความร้อนและภาระของเครื่องปรับอากาศ ทำการทดสอบการจัดการพลังงานในแนวทางการจัดการพลังงานดังนี้ Firm คือ การจัดการพลังงานให้มีความเสถียรและเชื่อถือได้ Peak Shaving คือการจัดการเพื่อลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่มีความต้องการสูงสุด วิธีนี้ช่วยลดภาระของระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูง Backup Power คือ การใช้ระบบพลังงานสำรองทำให้มีไฟฟ้าใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ลดความเสี่ยงจากการสูญเสียพลังงาน



และช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า Load Shifting คือ การเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานจากช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานสูง (Peak Demand) ไปยังช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานต่ำ (Off-Peak) ซึ่งช่วยลดภาระของระบบไฟฟ้า และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานผลของงานวิจัยดังกล่าวพบว่ามีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดลดลงจากเดิมประมาณ 20% จากมาตรการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้า และความร้อนที่ลดลงจากการปรับปรุงด้านสถาปัตยกรรม, อาคารที่วิจัยอยู่ในเกณฑ์การใช้พลังงานใกล้เคียงเท่ากับศูนย์, วิธีบริหารจัดการพลังงานใหม่ Firm เหมาะกับอาคารที่เป็นสำนักงานทั่วไป โหมด Peak Shifting เหมาะกับการใช้งานกับประเภทโรงงานหรือโรงแรม โหมด Load Shifting เหมาะกับอาคารที่มีการใช้พลังงานสูงในช่วงเวลาหนึ่ง และอาคารที่ใช่วิจัยเหมาะสมกับโหมด Adaptive Operation เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างจะผันผวนจำเป็นต้องรู้ค่าของพลังงานที่อาคารต้องการโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวัน เพื่อที่จะได้คำนวณและกำหนดขนาดของพลังงานได้ในแต่ละช่วงเวลางานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานทดแทน และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อสร้างอาคารที่ใช้พลังงานเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ Near Zero (nZEB) โดยมีวัตถุประสงค์คือใช้งบประมาณในการติดตั้งน้อยที่สุด [11] ได้มีการทดสอบแบบจำลอง เพื่อหาแนวทางที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุด ผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่าการใช้พลังงานทดแทนสามารถใช้เป็นตัวแปรในการประเมินการสร้างอาคารที่ใช้พลังงานเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์โดยใช้งบประมาณต่ำสุดได้ และงานวิจัยการหาความเหมาะสมสำหรับการใช้พลังงานรวมสุทธิในอาคารเป็นศูนย์ ได้นำเสนอตัวแปรการหาความเหมาะสมที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค [12] เช่น ความเหมาะสมในด้าน เศรษฐศาสตร์ สิ่งแวดล้อม พลังงาน ความมั่นคงของกริดจากสภาวะอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคจากหลากหลายงานวิจัยซึ่งมีความแตกต่างกันของแต่ละสภาพปัจจัยแวดล้อมโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อช่วยนักออกแบบของ Net Zero ในการเลือกตัวเลือกการออกแบบที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากการประเมินอย่างเป็นระบบ และงานวิจัยการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี

ประสิทธิภาพสูงที่สุด [13] พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทโมโนคริสตัลไลน์มีประสิทธิภาพดีที่สุด ระบบไฮบริดที่ออกแบบสามารถลดต้นทุนพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าระบบทั่วไป และงานวิจัยศึกษาและวิเคราะห์ระบบพลังงานหมุนเวียนแบบออฟกริด [14] มีเป้าหมายหลักคือการลดต้นทุนพลังงานโดยวิเคราะห์จากมูลค่าปัจจุบันสุทธิพบว่า การเพิ่มอัตราเงินเพื่อช่วยลดต้นทุนพลังงานได้และยังนำเสนอผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และ Shivam K et al. [15] ทบทวนสถานะปัจจุบัน ความท้าทาย และทิศทางในอนาคตของระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดที่รวมแบตเตอรี่มีบทบาทสำคัญในการลดการใช้พลังงานฟอสซิลและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ความท้าทายหลักของระบบนี้คือต้นทุนที่สูงของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้นหากนำเทคโนโลยี AI มาช่วยจัดการพลังงานอย่างชาญฉลาด โดยเฉพาะในช่วงที่ความต้องการพลังงานสูงสุด (Peak Load) ซึ่งแบตเตอรี่สามารถเข้ามาช่วยลดภาระของระบบได้ ด้วยเหตุนี้ ระบบไฮบริดจึงถือเป็นโซลูชันที่มีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตพลังงานอย่างยั่งยืนในอนาคต

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการหาขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ [16] และระบบกักเก็บพลังงานส่วนของการประเมินกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ใช้ข้อมูลการผลิตได้จริงจากอาคารต้นแบบในพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมของ กฟผ. แม่เมาะ ส่วนการคำนวณตัวแปรอื่น ๆ มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 การประเมินกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้จริงจากอาคารต้นแบบที่มีการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมของ กฟผ. แม่เมาะ ขนาด 55kW ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับกลุ่มบ้านพักพนักงาน กฟผ. โดยอนุमानว่าเป็นพื้นที่เดียวกันจึงมีค่าความเข้มแสง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และมุมตกกระทบของ



รังสีเหมือนกันดังนั้นจึงใช้ข้อมูลที่เกิดขึ้นได้จริงนี้มาประเมินสำหรับพื้นที่บ้านพักพนักงาน กฟผ. แม่เมาะ

2.2 หลักการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน [11, 17, 18]

การชาร์จหรือการปล่อยประจุของระบบกักเก็บพลังงานในงานวิจัยนี้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ ดังนั้นหากจะนำไปคำนวณหาความเหมาะสมจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และจัดให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการตัวแบบของระบบกักเก็บพลังงาน สถานการณ์ชาร์จแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

การชาร์จประจุแบตเตอรี่

$$BL_h = BL_{h-1} + \frac{(\eta_{BC} * \eta_{AD}) * eB_{in_h}}{\eta_{BD} * \eta_{DA}} \quad (1)$$

การปล่อยประจุแบตเตอรี่

$$BL_h = BL_{h-1} - \frac{(\eta_{BC} * \eta_{AD}) * eB_{out_h}}{\eta_{BD} * \eta_{DA}} \quad (2)$$

เมื่อ $BL_h \geq SOC_{min} * capB$
 $BL_h \leq capB$
 $BL_{h=24} = capB$

η_{BC}	คือ ประสิทธิภาพในการชาร์จแบตเตอรี่
η_{AD}	คือ ประสิทธิภาพในการปล่อยประจุของแบตเตอรี่
η_{BD}	คือ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ
η_{DA}	คือ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง
eB_{in_h}	คือ พลังงานที่จ่ายเข้าไปยังแบตเตอรี่ในช่วงเวลา h (kWh)
eB_{out_h}	คือ พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายออกมาในช่วงเวลา h (kWh)
SOC_{min}	คือ ระดับประจุที่น้อยที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถคงไว้ (%)
$capB$	คือ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (kWh)
BL_h	คือ ความจุแบตเตอรี่ ณ เวลาเริ่มต้น h

BL_{h-1} คือ ความจุแบตเตอรี่ ณ เวลาก่อนหน้า

$BL_{h=24}$ คือ ความจุแบตเตอรี่ ณ เวลาสิ้นสุด

ข้อจำกัดของการชาร์จและการปล่อยประจุสูงสุดของแบตเตอรี่ประกอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

$$eB_{in_h} * (\eta_{BC} * \eta_{AD}) + \frac{eB_{out_h}}{\eta_{BD} * \eta_{AD}} \leq F_{max} * capB * \Delta h \quad (3)$$

F_{max} คือ อัตราการชาร์จและการปล่อยประจุของระบบกักเก็บพลังงานสูงสุด (%)

K_h คือ การไหลของพลังงานในโหมดการชาร์จแบตเตอรี่ โดยให้เป็นตัวแปรไบนารีที่มีค่าเท่ากับ 1

φ_h คือ การไหลของพลังงานในโหมดปล่อยประจุออกจากแบตเตอรี่ โดยให้เป็นตัวแปรไบนารีที่มีค่าเท่ากับ 1

Δh คือ ระยะเวลาในช่วงเวลาที่พิจารณา

$$eB_{in_h} < capB * K_h$$

$$eB_{out_h} \leq capB * \varphi_h$$

$$K_h + \varphi_h \leq 1$$

กำหนดให้มีพลังงานไหลเข้าแบตเตอรี่เมื่อตัวแปรไบนารี K_h และ φ_h มีค่าเท่ากับ 1

$$eB_{in_h} - M_{big} * K_h \leq 0$$

$$eB_{in_h} - M_{big} * (1 - K_h) \geq \varepsilon$$

$$eB_{out_h} - M_{big} * \varphi_h \leq 0$$

$$eB_{out_h} - M_{big} * (1 - \varphi_h) \geq \varepsilon$$

M_{big} คือ ค่าคงที่พลังงานที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อควบคุมการทำงานของโหมดชาร์จหรือคายประจุในระบบแบตเตอรี่เมื่อตัวแปรไบนารีเปลี่ยนค่า

เมื่อ ε คือ ปริมาณพลังงานที่น้อยที่สุดที่ถูกจ่ายเข้าไปในแบตเตอรี่เมื่อตัวแปรไบนารีมีค่าเท่ากับ 1

การคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เท่ากับ 320 โวลต์ อัตราการปล่อย



ประจุของแบตเตอรี่แบบ deep-cycle ที่ 60% ของประจุรวม โดยประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์อยู่ที่ 85% ดังนี้

$$Cap = \frac{Unit \times 1000}{V \times Eff^b \times Eff^i} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ V คือ แรงดันของแบตเตอรี่

Eff^b คือ ประสิทธิภาพแบตเตอรี่

Eff^i คือ ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์

Cap คือ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Ah)

$Unit$ คือ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อวัน

2.4 การเก็บข้อมูล

2.4.1 การเก็บข้อมูลการใช้พลังงาน

ในงานวิจัยนี้ใช้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลในการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ปีสำหรับบ้านพักพนักงาน กฟผ. แม่เมาะ มีจำนวน 11 หลัง แต่ละหลังมีความสูง 4 ชั้นจำนวนห้องหลังละ 20 ห้องดังนั้นจึงมีห้องพักทั้งสิ้น 220 ห้องเพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าทุก 15 นาทีตัวอย่างข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 1

641					
	Time	Room	I	V	PF
110	1/1/2021 00:00:00	641-14	0.21	227.88	-1.0
111	1/1/2021 00:00:00	641-22	0.33	227.66	0.44
260	1/1/2021 00:00:00	641-24	4.66	227.65	-0.94
261	1/1/2021 00:00:00	641-31	0.57	227.82	-0.98
262	1/1/2021 00:00:00	641-32	0.23	226.81	-1.0
263	1/1/2021 00:00:00	641-33	0.2	227.77	-1.0
264	1/1/2021 00:00:00	641-34	0.23	226.72	-1.0

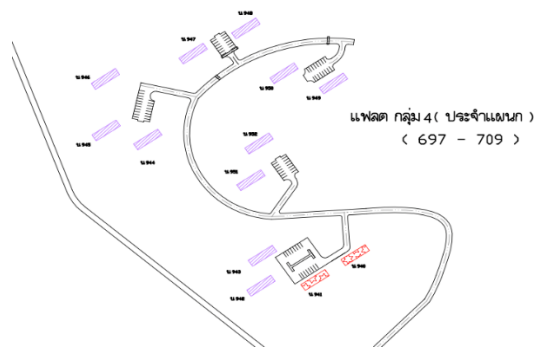
รูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่บันทึกจากเซอร์เวอร์แผนสารสนเทศ กฟผ. ของกลุ่มตัวอย่าง

จากรูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลข้อมูลดิบที่ได้ประกอบด้วยข้อมูลเลขอาคารต่อด้วยเลขห้องพัก ข้อมูลทางไฟฟ้าที่บันทึกได้ ได้แก่ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าความต่างเฟส

หลังจากนั้นนำข้อมูลข้างต้นคัดกรองแบ่งกลุ่มให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการคือปริมาณการใช้ไฟฟ้าของแต่ละห้องพักรวมเป็นการใช้งานของกลุ่มอาคาร ทุก ๆ 15 นาที

2.4.2 การตรวจวัดขนาดพื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ตรวจวัดและประเมินพื้นที่ที่สามารถติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในบ้านพักพนักงานโดยประเมินจากพื้นที่ว่างรอบกลุ่มอาคารโดยกำหนดให้พื้นที่ระบายสีเทาคือพื้นที่ติดตั้ง ดังตัวอย่างรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการประเมินขนาดพื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในแพลตฟอร์ม 4

2.5 การวิเคราะห์หาความเหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานทางด้านเศรษฐศาสตร์

Objective Function (OF) [11] คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยตามวัตถุประสงค์ในการติดตั้งที่มีความสัมพันธ์กัน คือ

- ขนาดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
- ขนาดระบบกักเก็บพลังงาน
- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการติดตั้ง
- ค่าใช้จ่ายอื่นๆตลอดระยะเวลาโครงการ

โดยรูปแบบที่มาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สร้างขึ้นเพื่อคำนวณต้นทุนในการติดตั้งระบบ ประกอบด้วยค่าอุปกรณ์ ค่าแรงในการติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาตลอดอายุโครงการ ค่าไฟฟ้าที่ลดได้จากการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานตลอดอายุโครงการ มูลค่าซาก ค่าไฟฟ้าที่ลดได้และค่าบำรุงรักษาตลอดอายุโครงการนำมาแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบันของเงิน กำหนดให้โครงการมีระยะเวลาเท่ากับอายุของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คือ 25 ปี เพื่อคำนวณต้นทุนในการบำรุงรักษาตลอดช่วงระยะเวลาของโครงการ คำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์มูลค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเงินเฟ้อในอนาคต ในงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ มูลค่ารวมตลอดโครงการที่น้อยที่สุดที่มีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมโดยกำหนดสมการดังนี้



$$OF = (capPV * ccPV + capPV * ccACS + capPV * ccISTL + capB * ccB + capPV * ccIVT) + ((capPV * ccMT + unitEL * e_{tariff}) * PV) - (SV * (capPV * ccPV + capPV * ccACS + capB * ccB + capPV * ccIVT)) \quad (4)$$

capPV	คือ กำลังผลิตของโมดูลที่ต้องการติดตั้ง (kW)
ccPV	คือ ต้นทุนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท/kW)
ccACS	คือ ต้นทุนค่าอุปกรณ์ติดตั้งระบบ (บาท/kW)
ccISTL	คือ ต้นทุนค่าแรงติดตั้ง (บาท/kW)
ccIVT	คือ ต้นทุนอินเวอร์เตอร์ (บาท/kW)
capB	คือ ขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องการติดตั้ง (kW)
ccB	คือ ต้นทุนของแบตเตอรี่ (บาท/kW/ปี)
ccMT	คือ ต้นทุนค่าบำรุงรักษา (บาท/kW/ปี)
unitEL	คือ หน่วยการใช้ไฟฟ้า (kWh/ปี)
e _{tariff}	คือ อัตราค่าไฟฟ้าจากผู้ให้บริการขายไฟฟ้า (บาท/kWh)
PV	คือ มูลค่าปัจจุบันของโครงการ
SV	คือ มูลค่าซาก

ในการคำนวณมูลค่ารวมตลอดโครงการจะมีตัวแปรที่เป็นค่าใช้จ่ายทุกปีตลอดโครงการจึงต้องนำตัวแปรนี้คำนวณเป็นมูลค่าปัจจุบันของโครงการ Present Value (PV) มูลค่าปัจจุบัน [19, 20] คืออัตราส่วนจะลดมูลค่าของกระแสเงินสดในอนาคตให้อยู่ในมูลค่าปัจจุบันซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบการลงทุนหรือกระแสเงินสดในระยะเวลต่างๆ ได้ ดังสมการที่ 5

$$PV = \frac{C}{(1+r)^t} \quad (5)$$

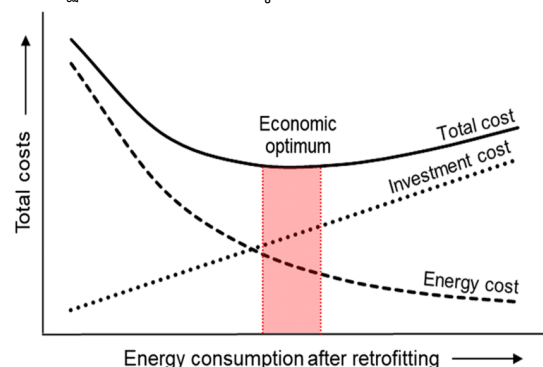
โดย PV = มูลค่าปัจจุบัน
C = กระแสเงินสดในอนาคต
r = อัตราส่วนลด
t = ช่วงเวลา (ปี)

กำหนดให้มีสมมติฐานในการคำนวณดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมมติฐานการวิเคราะห์หาความเหมาะสมและต้นทุนในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน

ข้อมูล	สมมติฐาน	อ้างอิง
อายุโครงการ	25 ปี	[21]
ต้นทุนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	30 บาท/W	[21]
อินเวอร์เตอร์	บาท	[21]
-Huawei Inverter 5kW 3 Phase	35650	
-Huawei Inverter 10kW3 Phase	58150	
-Huawei Inverter 15kW3 Phase	64420	
ต้นทุนแบตเตอรี่	20,000 บาท/kW	[21]
อัตราค่าไฟฟ้า	4.3 บาท/หน่วย	[22]
ค่าติดตั้ง	4000 บาท/kW	[21]
ค่าซ่อมบำรุง	50 บาท/แผง	[23]
ค่าอุปกรณ์ในการติดตั้ง	500 บาท/แผง	[21]
มูลค่าซาก	1%	[24]
Discount Rate	6.25%	[25,26]
Battery Efficiency	60%	[21]

เมื่อแทนตัวแปรสมมติฐานทั้งหมดผลที่ได้ คือ มูลค่ารวมของโครงการโดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการให้มูลค่ารวมของโครงการต่ำที่สุดจึงจะมีความเหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิแสดงการประเมินกำลังผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และขนาดระบบกักเก็บพลังงานที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด ที่มา: Felius et al., 2020 [27]

ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์มูลค่ารวมของโครงการคือกำลังผลิตของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่ติดตั้ง ในการหาค่าความเหมาะสมของสมการนี้จึงใช้วิธี GRG [2] เพื่อแทนตัว



แปรทั้ง 2 ตัวในสมการ และเปลี่ยนแปลงตัวแปรไปเรื่อย ๆ จนพบจุดที่ต่ำที่สุดของมูลค่ารวมโครงการ และจะทำให้ทราบกำลังผลิตของโมดูล และ ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ จากนั้นจึงคำนวณระยะเวลาคืนทุนโดยที่ระยะเวลาคืนทุน [20] คำนวณจากสมการที่ (6)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันของระบบ}}{\text{มูลค่าพลังงานที่ประหยัดได้รายปี}} \quad (6)$$

2.6 การวิเคราะห์หาความเหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานทางด้าน

เศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป GRG.

(Generalized Reduced Gradient) [2]

อัลกอริธึม GRG (Generalized Reduced Gradient)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความเหมาะสม (optimization) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันที่มีข้อจำกัดในรูปแบบที่หลากหลายทั้งที่เป็นเชิงเส้น (linear) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งมักพบในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรม โดยเฉพาะสำหรับปัญหาที่มีฟังก์ชันและข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยการกำหนดปัญหาให้เป็นฟังก์ชัน ซึ่งต้องการหาค่าต่ำสุด คำนวณค่าความชันโดยใช้การประมาณค่าความชันของฟังก์ชันและข้อจำกัดโดยใช้วิธี เช่น การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันและอเบตค่าในแต่ละรอบของตัวแปรที่เป็นไปตามข้อจำกัดที่ให้ไว้ในงานวิจัยนี้ตัวแปรคือ กำลังผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานโดยการใช้วิธีการค้นหาในทิศทางที่เหมาะสม เช่น วิธีกราดิเอนต์จะเข้าซ้ำโดยการเปลี่ยนตัวแปรที่กำหนดจนกว่าจะถึงเกณฑ์หยุด เช่น จำนวนรอบที่กำหนด หรือเมื่อการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด โดยจะทำให้ทราบผลของตัวแปรที่ทำให้เกิดเกณฑ์หยุด และผลของตัวแปรอาจเปลี่ยนแปลงออกไปตามข้อจำกัดที่กำหนดเพิ่มเติม

GRG เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งในทางเศรษฐศาสตร์ โดยที่ ข้อได้เปรียบของ GRG เมื่อเทียบกับวิธีอื่น คือ

1.) เปรียบเทียบกับ Linear Programming (LP)

LP เหมาะสำหรับปัญหาที่ทุกสมการเป็นเชิงเส้น แต่ไม่สามารถจัดการกับปัญหาที่มีฟังก์ชันหรือข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้

2.) เปรียบเทียบกับ Newton's Method: Newton's Method ต้องการการคำนวณ Hessian Matrix ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง โดยเฉพาะเมื่อจำนวนตัวแปรเพิ่มขึ้น GRG มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัญหาที่มีตัวแปรจำนวนมากหรือข้อจำกัดซับซ้อน

3.) เปรียบเทียบกับ Stochastic Methods (เช่น Genetic Algorithm, Simulated Annealing) Stochastic Methods มักเหมาะสมกับปัญหาที่เป็น Non-convex หรือมีฟังก์ชันที่ไม่สามารถหา Gradient ได้ง่ายอย่างใดก็ตาม GRG จะรวดเร็วและแม่นยำกว่าสำหรับปัญหาที่ฟังก์ชันสามารถหา Gradient ได้

2.6.1 สร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด

สร้างสมการวัตถุประสงค์ $f(x,y)$ ที่ต้องการหาค่าน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ถูกกำหนดไว้ในสมการที่ (4) โดยมีข้อจำกัดคือ $g(x,y)$ คือขนาดเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่ต้องการติดตั้ง โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(\text{capPV}, \text{capB}) = & (\text{capPV} * \text{ccPV} + \text{capPV} * \text{ccACS} \\ & + \text{capPV} * \text{ccISTL} + \text{capB} * \text{ccB} \\ & + \text{capPV} * \text{ccIVT}) + ((\text{capPV} * \text{ccMT} \\ & + \text{unitEL} * \text{e}_{\text{tariff}}) * \text{PV}) - \\ & (\text{SV} * (\text{capPV} * \text{ccPV} + \text{capPV} * \text{ccACS} \\ & + \text{capB} * \text{ccB} + \text{capPV} * \text{ccIVT})) \end{aligned} \quad (7)$$

โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดคือ $g(x,y)$ โดยเราสามารถกำหนด capB เพื่อหา capPV หรือสลับกันได้ดังสมการ

$$\text{Subject to } g(\text{capPV}, \text{capB}) \quad (8)$$

2.6.2 คำนวณ Reduced Gradient

มีวัตถุประสงค์ในการใช้การประมาณค่า Gradient ของฟังก์ชันวัตถุและข้อจำกัด

$\nabla f(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุ: Gradient ของ $f(x)$

$\nabla g_i(x)$ คือ ข้อจำกัดไม่เชิงเส้น: Gradient ของ $g(x)$



เมื่อมีการประมาณได้ค่าหนึ่งแล้วจะทำการคำนวณ Reduce Gradient เพื่อลดมิติ และหาทิศทางในการแก้ปัญหาโดยใช้ Lagrangian Function เพื่อรวมข้อจำกัดในปัญหา optimization โดยมีสมการดังนี้

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) + \sum_{j=1}^p u_j h_j(x) \quad (9)$$

โดย λ_i และ u_j เป็น multipliers สำหรับข้อจำกัดที่ไม่เชิงเส้นและเชิงเส้นตามลำดับ

$g_i(x)$ คือ ข้อจำกัดเชิงลบแบบไม่เท่ากัน (Inequality constraint),

$h_j(x)$ คือ ข้อจำกัดเชิงเส้นแบบเท่ากัน (Equality constraint)

$h_j(x)$ คือ ตัวคูณลากรางเซียน (Lagrange multiplier) สำหรับข้อจำกัดเชิงลบ

u_j คือ ตัวคูณลากรางเซียนสำหรับข้อจำกัดเชิงเส้น

p, m คือ จำนวนข้อจำกัดที่มี (ทำตาราง)

2.6.3 การอัปเดตค่าตัวแปร

การอัปเดตค่าตัวแปรใน GRG ใช้ gradient ที่ลดมิติ และ Lagrangian multipliers จะทำให้เปลี่ยนตัวแปรในการคำนวณให้สอดคล้องกับข้อจำกัดโดยมีสมการอัปเดตค่าตัวแปรดังนี้

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \nabla f^R(x_k) \quad (10)$$

โดยที่ α_k เป็นขนาดของขั้นตอน (step size) ที่กำหนดในแต่ละรอบ

x_k คือ ค่าของตัวแปร x ในรอบที่ k (ค่าเริ่มต้น)

x_{k+1} คือ ค่าของตัวแปร x ในรอบถัดไป

$f^R(x)$ คือ ฟังก์ชันที่ต้องการลดค่า

∇f^R คือ เวกเตอร์เกรเดียน (Gradient vector) ของฟังก์ชัน $f^R(x)$ ที่จุด x_k

2.7 ประสิทธิภาพทางพลังงาน

เมื่อหาค่าที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์แล้วต้องมีการศึกษาปัจจัยเพิ่มเติมเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของการลดการใช้พลังงาน

PV Utilization rate [28] หมายถึง อัตราการใช้ประโยชน์จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยวัดจากพลังงานที่ได้รับจริงจากระบบเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้จากการคำนวณช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยมีสมการดังนี้

PV Utilization rate=

$$\frac{\text{พลังงานที่ใช้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์}}{\text{พลังงานที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้}} \times 100\% \quad (11)$$

สัดส่วนพลังงานที่ลดได้ [29] การคำนวณสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้ช่วยให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการลดการใช้พลังงาน และช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการลงทุนในเทคโนโลยีใหม่หรือการดำเนินการเพื่อประหยัดพลังงาน โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{\text{สัดส่วนพลังงานที่ลดได้} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ลดได้}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ก่อนการลด}} \times 100\% \quad (12)$$

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 พื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ในการประเมินพื้นที่ติดตั้งกำหนดให้ขนาดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รวมระยะห่างระหว่างแผงข้างละ 0.01 เมตร คือ ขนาด 2X1 เมตร และกำหนดให้เว้นช่องว่างทางเดินเพื่อบำรุงรักษาโมดูลขนาด 1 เมตร กำหนดให้พื้นที่ว่างในการบำรุงรักษามีขนาด 20% ของพื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดผลที่ประเมินได้ตามตารางที่ 2



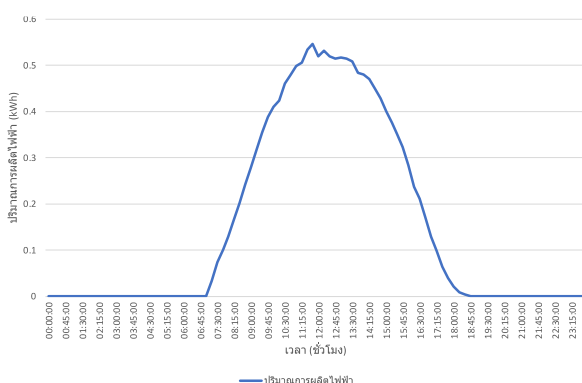
ตารางที่ 2 พื้นที่ประเมินสำหรับติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

พื้นที่ว่างใน การติดตั้ง (ตร. ม.)	พื้นที่สามารถติดตั้ง โมดูลเซลล์ แสงอาทิตย์ได้ (ตร.ม.)	จำนวน โมดูลที่ สามารถ ติดตั้งได้ (โมดูล)	พื้นที่สำหรับ บำรุงรักษา (ตร.ม.)
2487	1990	995	497

3.2 ปริมาณการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากการประเมินกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้สามารถนำข้อมูลการผลิตได้จริงจากอาคารต้นแบบที่มีการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมของ กฟผ. แม่เมาะ ขนาด 55kW ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับกลุ่มบ้านพักพนักงาน กฟผ.แม่เมาะ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำข้อมูลการผลิตไฟฟ้าทุก 15 นาทีของอาคารต้นแบบมาวิเคราะห์โดยค่าที่นำมาใช้คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อ 1 kW ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4

จากบทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คืองานวิจัยที่ [8] โดยผลที่ได้มีความแตกต่างเนื่องจากการเป็นการหาลำดับผลิตไฟฟ้าจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้านอุณหภูมิ ความเข้มของรังสี มุมรังสีที่ตกกระทบโมดูลเพื่อปรับใช้งานได้ตามสถานะของแต่ละพื้นที่ แต่งานวิจัยนี้ได้นำผลการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่จริงมาวิเคราะห์

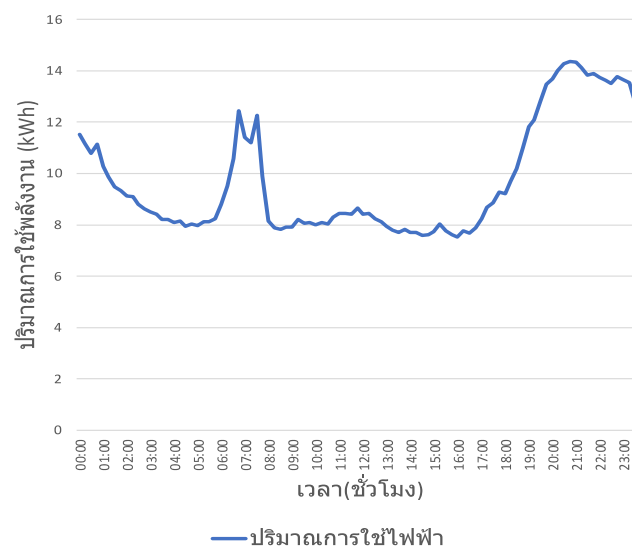


รูปที่ 4 ตัวอย่างข้อมูลการผลิตไฟฟ้าทุก 15 นาทีของอาคารต้นแบบ

3.3 พฤติกรรมการใช้พลังงานของกลุ่มบ้านพักพนักงาน

เมื่อนำข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้ามาวิเคราะห์พบว่า มีห้องที่ใช้ไฟฟ้าเพียง 72 ห้องจากทั้งหมด 220 ห้อง เมื่อวิเคราะห์ปริมาณ

การใช้ไฟฟ้าทุก 15 นาทีของอาคารต้นแบบมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิ พบว่า มีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในปริมาณสูงช่วงกลางวัน และต่ำในช่วงกลางคืน มีการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลา 20.00 น.-23.30 น. และ เวลา 6.00 น. - 7.00 น. โดยแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 พฤติกรรมการใช้ ไฟฟ้าเฉลี่ยของกลุ่มบ้านพักพนักงาน กฟผ. เป็นระยะเวลา 1 ปี

จากบทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยด้านพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าประกอบด้วยงานวิจัย [6] ในงานวิจัยใช้ข้อมูลจากใช้ไฟฟ้าทุก 30 นาที ส่วนงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลทุก 15 นาที เป็นเวลา 1 ปีเช่นเดียวกัน ข้อแตกต่างสำหรับพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าได้ใช้ WFS ในการคัดแยกพฤติกรรมที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าแต่งงานวิจัยนี้ใช้พฤติกรรมปริมาณการใช้ไฟฟ้าตามช่วงเวลา

3.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3) โดยใช้ข้อมูลการใช้ไฟฟ้า และปริมาณการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับสมมติฐานต้นทุนราคาที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 มาคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าสามารถแบ่งการหาความเหมาะสมในการติดตั้งได้ 2 กรณี ดังนี้

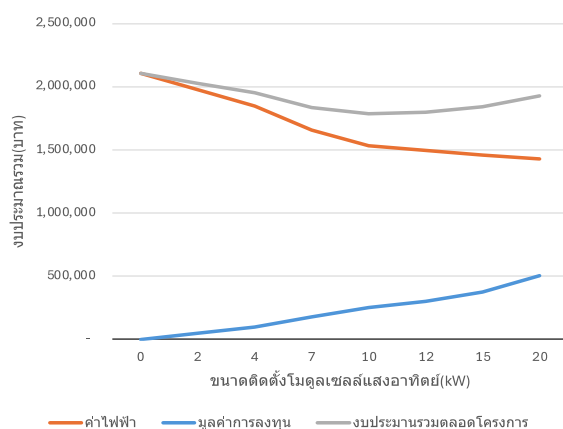
3.4.1 กรณีติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ในกรณีติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ GRG หามูลค่ารวมของโครงการที่ต่ำที่สุดพบว่าสามารถหาได้โดยมีค่ากำลังการผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 9 kW ข้อมูลดังแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณค่าที่เหมาะสมในกรณีติดตั้ง
เฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

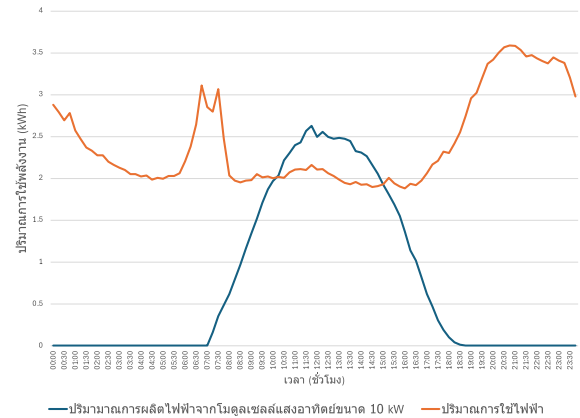
PV (kW)	Electricity Cost	Investment Cost	Total Cost
0	2,105,663	-	2,105,663
2	1,977,440	50,193	2,027,634
4	1,849,218	100,387	1,949,605
7	1,658,930	175,677	1,834,607
10	1,534,166	250,967	1,785,134
12	1,496,481	301,161	1,797,641
15	1,462,028	376,451	1,838,479
20	1,428,639	501,934	1,930,573

เมื่อนำตัวแปรค่าไฟฟ้า มูลค่าการลงทุน และมูลค่ารวมของ
โครงการมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิจะเห็นว่าจุดที่
เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ คือ จุดที่ต่ำที่สุดของเส้น
งบประมาณรวมโครงการเนื่องจากหากติดตั้งเพิ่มจะใช้งบ
ลงทุนเพิ่มแต่ค่าไฟฟ้าลดลงได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงการประเมินขนาดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
ที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด

โดยการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 10 kW มีระยะเวลา
คืนทุนคือ 2 ปี 9 เดือนในด้านประสิทธิภาพทางพลังงาน
พบว่า PV Utilization Rate = 89.14% และสัดส่วน
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ = 27.14% เมื่อนำกำลังไฟฟ้าที่โมดูล
เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้เทียบกับปริมาณการใช้
พลังงานแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิ โดยแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้
เทียบกับปริมาณการใช้พลังงาน

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าแผนภูมิการผลิตไฟฟ้าของ
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ใต้แผนภูมิการใช้พลังงานซึ่ง
ครอบคลุมการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 94 % จึงทำให้การติดตั้ง
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คุ้มค่าช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงาน
ได้มากเมื่อรวมกับมูลค่าการลงทุนจึงทำให้มูลค่ารวมตลอด
โครงการต่ำที่สุด

3.4.2 กรณีติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ กักเก็บพลังงาน

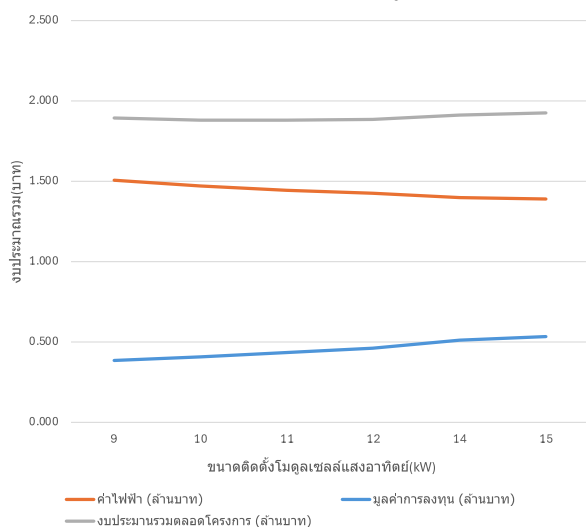
ในกรณีติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ
กักเก็บพลังงานโดยใช้ GRG หามูลค่ารวมของโครงการที่ต่ำ
ที่สุดพบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือการไม่ติดตั้งระบบกักเก็บ
พลังงานพลังงานเนื่องจากราคาแบตเตอรี่ที่สูง ณ ปัจจุบัน
ดังนั้นจึงใช้เกณฑ์ทางประสิทธิภาพทางพลังงานในการหา
ขนาดระบบกักเก็บพลังงานโดยการใช้พลังงานจากโมดูล
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตเกินความต้องการให้คุ้มค่าที่สุด
หรือ PV Utilization 100% พบว่าต้องติดตั้งระบบกักเก็บ
พลังงานพลังงานขนาด 8 kW.จะทำให้ได้ PV Utilization
99% แต่ทั้งนี้เมื่อกำหนดให้ระบบกักเก็บพลังงานมีขนาด 8
kWh.แล้ว ใช้วิธี GRG หา มูลค่ารวมของโครงการที่ต่ำที่สุด
อีกครั้งพบว่า กำลังผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
เปลี่ยนไปจาก 9 kW เป็น 11 kW ทั้งนี้พบว่า PV
Utilization ลดลงเหลือ 90% รายละเอียดข้อมูลดังแสดง
ตามตารางที่ 4



ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณค่าที่เหมาะสมในกรณีติดตั้ง
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน

PV (KW)	Batt (KWh)	ค่าไฟฟ้า (ล้านบาท)	มูลค่าการลงทุน (ล้านบาท)	มูลค่ารวมตลอด โครงการ (ล้านบาท)	PV Utilization
9	8	1.510	0.386	1.896	0.99
10	8	1.471	0.411	1.882	0.95
11	8	1.445	0.436	1.881	0.90
12	8	1.427	0.461	1.888	0.85
14	8	1.402	0.511	1.913	0.75
15	8	1.392	0.536	1.929	0.71

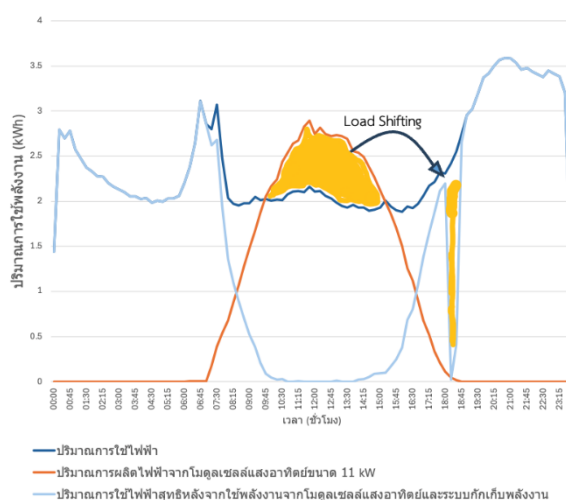
เมื่อนำตัวแปรค่าไฟฟ้า, มูลค่าการลงทุน และมูลค่ารวมของ
โครงการมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิจะเห็นว่าจุดที่
เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ คือ จุดที่ต่ำที่สุดของเส้น
งบประมาณรวมโครงการเนื่องจากหากติดตั้งเพิ่มจะใช้ลงทุน
เพิ่มแต่ค่าไฟฟ้าลดลงได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภูมิแสดงการประเมินขนาด โมดูลเซลล์
แสงอาทิตย์ที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด

โดยการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 11 kW ระบบกัก
เก็บพลังงานพลังงานขนาด 8 kW มีระยะเวลาคืนทุน คือ 4 ปี
ในด้านประสิทธิภาพทางพลังงานพบว่า PV Utilization Rate
= 90.00% และสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้ = 30.50% ใน

ด้านการบริหารจัดการพลังงานด้วยระบบกักเก็บพลังงาน ใช้
เทคนิคการบริหารจัดการพลังงานแบบ Load shifting โดยการ
ใช้พลังงานที่เหลือจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชาร์จเข้าระบบกัก
เก็บพลังงาน และจ่ายพลังงานถูกใช้จนหมดตั้งแต่เวลาประมาณ
18.00 น -18.30 น. ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงในแต่ละเดือนทำให้
ภาพรวมการใช้พลังงานลดลง โดยแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบ
กักเก็บพลังงานพลังงานสามารถผลิตได้เทียบกับปริมาณ
การใช้พลังงาน

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าแผนภูมิการผลิตไฟฟ้าของโมดูล
เซลล์แสงอาทิตย์อยู่ใต้แผนภูมิการใช้พลังงานซึ่งครอบคลุม
การใช้ไฟฟ้ามากกว่า 90 % โดยพลังงานที่เหลือ 10% ได้
กำหนดให้ชาร์จเข้าระบบกักเก็บพลังงาน และจ่ายพลังงาน
หลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไม่ได้ทำให้ใช้พลังงาน
จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้คุ้มค่าและลดการใช้พลังงาน
จากกริดได้เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน

3.5 อภิปรายผลลัพธ์

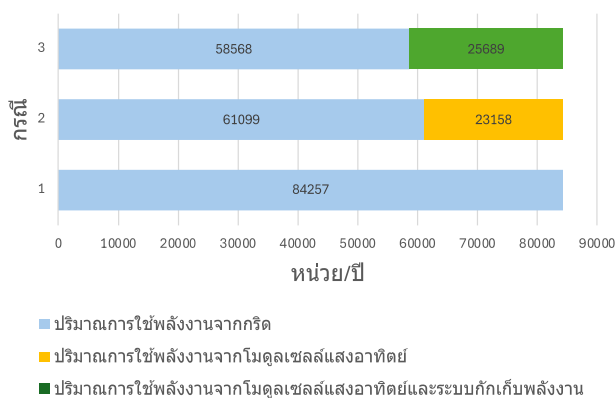
1.) ด้านความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

พบว่าการตัดสินใจไม่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีมูลค่า
รวมตลอดโครงการที่สูงที่สุดเนื่องจากไม่มีการผลิตไฟฟ้าจากโมดูล
เซลล์แสงอาทิตย์ชดเชยค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่าย หากมีการตัดสินใจ
ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน
และ 4 ปีในกรณีติดตั้งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน โดยการติดตั้ง
ระบบกักเก็บพลังงานมีการคืนทุนช้ากว่า เนื่องจากราคาระบบกัก
เก็บพลังงานในปัจจุบันมีราคาสูงและใช้เงินในการลงทุนมากกว่า
ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 0.185 ล้านบาท ดังนั้นจึงควร

ตัดสินใจติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพียงกรณีเดียวก่อน ทั้งนี้หากพิจารณาระยะเวลาคืนทุนสำหรับการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ประหยัดได้ลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน อีกทั้งยังเป็นการชะลอการลงทุนหากแนวโน้มระบบกักเก็บพลังงานมีราคาที่ถูกลงในอนาคต

เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับเป้าหมายของรัฐบาลเกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานฟอสซิลจึงควรเลือกตั้งนั้นควรเลือกกรณีที่ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน โดยสามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้มากถึง 30.5 % หรือลดการใช้ไฟฟ้าได้ 25,689 หน่วย/ปี และช่วยลดการปล่อย CO₂ ได้ 30,827 กิโลกรัมต่อปี

โดยกรณีที่ 1 คือการไม่ติดตั้งและใช้ไฟฟ้าจากกริด กรณีที่ 2 คือการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 3 คือการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการใช้พลังงานรวมใน 1 ปีจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ 2 และ 3 มีสัดส่วนการใช้พลังงานจากกริดลดลงโดยกรณีที่ 3 สามารถลดการใช้พลังงานจากกริดได้มากที่สุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 สัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานจากกริดที่ลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ต้องการหาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานโดยความเหมาะสม โดยใช้อัลกอริทึม GRG แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมพบว่าหากต้องการให้มูลรวม

โครงการต่ำที่สุดต้องตัดสินใจติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10kW โดยใช้เงินลงทุน 250,967 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือนมูลค่ารวมตลอดโครงการ 1,785,134 บาท ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะทำให้มูลค่ารวมของโครงการต่ำที่สุด และมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งนี้หากต้องการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้เกณฑ์ในการติดตั้งคือติดตั้งตามกำลังผลิตที่เหลือจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ PV Utilization 100% ซึ่งจะมีมูลค่ารวมตลอดโครงการที่สูงกว่าโดยใช้เงินลงทุน 436,064 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 4 ปี มูลค่ารวมตลอดโครงการ 1,881,400 บาท ทั้งนี้หากวัตถุประสงค์ของการติดตั้งมีได้จำกัดเพียงมูลค่ารวมตลอดโครงการที่ต่ำที่สุดหากแต่ยังคำนึงถึงเรื่องการอนุรักษ์พลังงาน การลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, Carbon Neutrality ที่รัฐบาลกำลังดำเนินการ ควรตัดสินใจติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน หากพบว่าใช้งบประมาณในการติดตั้งที่สูงให้ดำเนินการติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพียงกรณีเดียวก่อน ทั้งนี้หากพิจารณาระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน สามารถนำค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ประหยัดได้ลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน อีกทั้งยังเป็นการชะลอการลงทุนหากแนวโน้มระบบกักเก็บพลังงานมีราคาที่ถูกลงในอนาคตสามารถติดตั้งเพิ่มเติมได้ในราคาที่ถูกลง

ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นแนวทางสำหรับการลดการใช้พลังงานโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานโดยคำนวณความคุ้มค่าจากมูลค่ารวมตลอดโครงการ และเป็นแนวทางในการตัดสินใจลดการใช้พลังงานโดยสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 27.14% ในกรณีติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว 30.50% ในกรณีติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานพลังงาน งานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าจำเป็นต้องตัดสินใจติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อลดการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลอีกทั้ง กฟผ. มีแผนขยายผลการศึกษาเรื่อง nZEB ไปยังอาคารอื่น ๆ ของ กฟผ. ซึ่งสามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นแนวทางตัดสินใจในการลงทุนดำเนินการและส่งเสริมให้เกิดการใช้ไฟฟ้าจากกริดใกล้เคียงศูนย์ตอนสนองนโยบายรัฐบาลและกระแสโลกที่กำลังสนับสนุนลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และกำหนดเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน



5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] The secretariat of the prime minister. The 27th Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP 27) and related meetings; 2022.
- [2] Energy Policy and Planning Office. Semi-annual report on carbon dioxide emissions from the energy sector: January - June; 2024.
- [3] Ministry of Energy. PDP 2018 revision; 2018.
- [4] Electricity Generating Authority of Thailand. Proposal for consideration to become a smart city, Mae Moh Smart City Project in Mae Moh District; 2019.
- [5] Minsan P. Comparing methods of optimization in Solver of Microsoft Excel 2007 and 2019: A case study of statistical models. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2021;31.
- [6] Wang F, Yu Y, Wang X, Ren H, Shafie-Khah M, Catalão JoP. Residential electricity consumption level impact factor analysis based on wrapper feature selection and multinomial logistic regression. Energies. 2018;11(5):1180.
- [7] Mouatasim AE, Darmane Y. Regression analysis of a photovoltaic (PV) system in FPO. AIP Conference Proceedings. 2018 Dec 20;2056(1).
- [8] Asanakham A, Guntiya I, Kiatsiriroat T. Performance prediction of poly-crystalline solar cell module under real practice. CMUL: Journal Articles. 2015;22(3):87-93.
- [9] Milan C, Bojesen C, Nielsen MP. A cost optimization model for 100% renewable residential energy supply systems. Energy. 2012;48(1):118-27.
- [10] Energy Research and Development Institute-Nakornping, University CM. Demonstration of near zero building EGAT Maemoh Training Center; 2021.
- [11] González-Mahecha RE, Lucena AFP, Szklo A, Ferreira P, Vaz AIF. Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings. Energy and Buildings. 2018;172:505-16.
- [12] Harkouss F, Fardoun F, Biwolé PH. Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. Energy. 2019;179:1155-75.
- [13] Irshad AS, Ludin GA, Masrur H, Ahmadi M, Yona A, Mikhaylov A, et al. Optimization of grid-photovoltaic and battery hybrid system with most technically efficient PV technology after the performance analysis. Renewable Energy. 2023;207:714-30.
- [14] Chaurasia R, Gairola S, Pal Y. Technical, economic feasibility and sensitivity analysis of solar photovoltaic/battery energy storage off-grid integrated renewable energy system. Energy Storage. 2022;4(1):e283.
- [15] Shivam K, Tzou J-C, Wu S-C. A multi-objective predictive energy management strategy for residential grid-connected PV-battery hybrid systems based on machine learning technique. Energy Conversion and Management. 2021;237:114103.
- [16] Riverola A, Vossier A, Chemisana D. Fundamentals of solar cells. In: Nanomaterials for Solar Cell Applications. Elsevier; 2019. p. 3-33.



- [17] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Electricity production from solar energy; 2018.
- [18] Malheiro A, Castro PM, Lima RM, Estanqueiro A. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems. *Renewable Energy*. 2015;83:646-57.
- [19] Ashouri A, Fux SS, Benz MJ, Guzzella L. Optimal design and operation of building services using mixed-integer linear programming techniques. *Energy*. 2013;59:365-76.
- [20] Wang B, Xia X, Zhang J. A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*. 2014;77:227-35.
- [21] PV Price List Available from: <https://www.greensmarttech.com/product/hua-wei10k-3p> [Accessed 19th August 2024].
- [22] Electricity tariffs: Available from: <https://www.pea.co.th/electricity-tariffs/> [Accessed 19th August 2024].
- [23] Service Fee Available from: <https://www.ecoenergythailand.com/> [Accessed 19th August 2024].
- [24] Chuchat R. Financial Cost Analysis of Solar Power Generation System in Rubberwood Processing Plants with Investment Promotion Policy Support. National Conference Walailak; 2019
- [25] Wasinsombat W, Chantuk T. Analysis of costs and financial returns of the prestressed concrete products business Kamphaeng Saen District Nakhon Pathom Province Veridian E-Journal, Silpakorn University. 2016;9:669-84.
- [26] Bank of Thailand. Daily Interest Rates of Commercial Banks. Available from: <https://www.bot.or.th/th/statistics/interest-rate.html/> [Accessed 19th August 2024].
- [27] Felius LC, Dessen F, Hrynyszyn BD. Retrofitting towards energy-efficient homes in European cold climates: a review. *Energy Efficiency*. 2020;13(1):101-25.
- [28] Vrettos E, Witzig A, Kurmann R, Koch S, Andersson G. Maximizing local PV utilization using small-scale batteries and flexible thermal loads. *EU PVSEC*;2013.
- [29] Hu J-L, Kao C-H. Efficient energy-saving targets for APEC economies. *Energy policy*. 2007;35(1):373-82.